

INFLUENCIA DE LA ADICION DE NANO SÍLICE, EN ALGUNOS ASPECTOS DE LA DURABILIDAD, EN HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES DE ALTA RESISTENCIA.

N. León¹, A. Moragues¹, J. Massana², E. Sanchez³

¹ Departamento de Ingeniería Civil-Construcción, Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos, C/ Prof. Aranguren s/n, 28040 Madrid, España.
E-mail: ne.leon@alumnos.upm.es
E-mail: amoragues@caminos.upm.es

² Departamento de Construcción y Vías Rurales, Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I. Agrónomos, Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid, España.
E-mail: jordi.massana@upm.es

³ Departamento de Ciencia y Tecnología Aplicadas a la Ingeniería Técnica Agrícola, Universidad Politécnica de Madrid. E.U.I.T. Agrícola, Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid, España.
E-mail: elvira.sanchez.espinosa@upm.es

RESUMEN

Con objeto de mejorar las prestaciones de los materiales y en particular los materiales de construcción, se está estudiando la incorporación de nano partículas en la fabricación de morteros y hormigones. En este trabajo se estudia el efecto de la incorporación de nano sílice a un hormigón autocompactante. Para ello se han seleccionado dos dosificaciones de nano sílice, 2,5% y 5% y se ha comparado su comportamiento con un hormigón autocompactante con la misma relación de material cementante. Se han evaluado las diferencias de comportamiento tanto en estado fresco como endurecido. En el trabajo se ha analizado el comportamiento mecánico (resistencia a compresión), microestructural (porosimetría por intrusión de mercurio y análisis termogravimétrico) y durable, (migración de cloruros y resistividad eléctrica), de las dosificaciones seleccionadas. Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión muestran una relación directa entre este parámetro y el porcentaje de nano sílice adicionada. Los resultados de la caracterización microestructural ponen de manifiesto un refinamiento de la matriz porosa, con aumento de la cantidad de geles hidratados y reducción del tamaño de poro, mas significativo cuanto mayor es el porcentaje de adición. En cuanto a la resistencia del material a la penetración de cloruros se observa una disminución significativa cuanto mayor es el porcentaje de nano adición. Los datos obtenidos del ensayo de migración y de resistividad eléctrica muestran un mejor comportamiento por efecto de la adición. Sin embrago la variación relativa de la variable estimada en cada uno de los ensayos es sensiblemente diferente.

ABSTRACT

Possible improvement to the properties of materials and in particular those used in construction, through the incorporation of nano-particles. This work studies the effect of incorporating nanosilica in a self-compacting concrete. The content of nanosilica varied in our 3 tests cases from 0% to 2.5% to 5%. Behaviour of the 3 varieties was measured in pre-hardening and hardened states. In addition to mechanical (compressive strength) and micro-structural characterisation (mercury intrusion porosity (MIP) and thermal gravimetric analysis (TGA)) of the 3 cases, their durability parameters, such as chloride penetration and electrical resistivity were measured. Tests of compressive strength showed a direct correlation with per cent of nanosilica added. Microstructural testing revealed a refined pore matrix, with an increase in hydrated gels, proportional to this percentage. Chloride penetration decreased significantly with increased percentage of added nanosilica. These results are in agreement with those obtained from electrical resistivity measurements.

PALABRAS CLAVE: Hormigón autocompactante, nano sílice, resistencia a compresión, estructura porosa, análisis termogravimétrico, penetración de cloruros.

1. INTRODUCCIÓN

La Instrucción del Hormigón Estructural EHE 08 [1] define al hormigón autocompactante (HAC) como "aquel hormigón que, como consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de aditivos

superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación, no presentando segregación, bloqueo de árido grueso, sangrado, ni exudación de la lechada". Por tanto, el hormigón autocompactante añade a las propiedades del

hormigón convencional, en cualquiera de las clases resistentes, la propiedad de autocompactabilidad, descrita anteriormente [2]. Por otra parte esta misma instrucción [1] define la durabilidad de una estructura de hormigón como su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural.

Tanto las propiedades mecánicas de un material cementicio, como sus características durables, dependen, en gran medida, de la cantidad de silicatos de calcio hidratados o geles hidratados (CSH), de la estructura porosa, y de la interfaz árido-pasta (ITZ). Para mejorar dichas propiedades se utilizan, desde hace mucho tiempo, diferentes adiciones en la mezclas (cenizas volantes, humo de sílice y escorias de alto horno...). El auge de la nanotecnología en las últimas dos décadas, atrajo considerable interés científico de la industria de la construcción, debido al alto potencial en la utilización de nano partículas en materiales cementicios. Estos permiten una reingeniería de los productos existentes y el diseño de nuevos materiales de altas prestaciones [3]

El caso particular de la adición de óxido de silicio de tamaño nanométrico, o nano sílice (nSi) ha despertado un creciente interés por su conocida actividad puzolánica, que es mayor que la del humo de sílice debido a su mayor superficie específica. La nSi puede reaccionar con el hidróxido de calcio o portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), produciendo una mayor cantidad de gel CSH y por tanto mejorando su resistencia mecánica a edades tempranas [4-8], además de densificar la matriz. Así, el tamaño y cantidad de cristales de portlandita se ven significativamente disminuidos, agrupándose en los poros pequeños de la pasta de cemento y cerrando los mismos, reduciéndose el tamaño de los poros. Mejoran así las propiedades durables del hormigón ya que al ser más compacto se dificulta la penetración de agentes agresivos.

Algunos autores han estudiado la influencia de nSi y nSi con cenizas volantes o con escorias de alto horno en hormigones convencionales [7-8] y en hormigones autocompactantes [9-10]. En todos los casos, la adición de nano sílice se utiliza con un coeficiente de eficacia 1, obteniendo mejoras en la resistencia a compresión y en la permeabilidad al agua. Sin embargo son muy pocos los trabajos en los que se estudia la influencia de la nSi en las propiedades durables de hormigones autocompactantes [10].

El objetivo de este trabajo es estudiar las características en estado fresco y endurecido de tres mezclas de hormigón autocompactante con 0%, 2.5% y 5% de adición de nSi con el fin de determinar la influencia de estas en las propiedades de autocompactabilidad,

resistencia a compresión, porosidad y distribución porosa, contenido de portlandita, así como en la penetración de cloruros.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Se ha utilizado cemento portland CEM I 52,5 R (CP) (Tabla 1), nano sílice (nSi) Levasil 200/40%, aditivo superplastificante SIKAVISCO 5720 (SP) y aditivo modificador de viscosidad (MV) SIKASTAB 4R.

Los áridos empleados en las mezclas son arena de río, grava rodada de 6 a 12 mm y filler calizo cuya granulometría cumple con la norma UNE 12620:2003+A1:2009

Tabla 1. Propiedades físico-químicas de CP y nSi.

Propiedad	CP	nSi
SiO_2	19.20	99.90
Al_2O_3	6.07	-
Fe_2O_3	1.70	-
CaO	63.41	-
MgO	2.56	-
SO_3	3.38	-
K_2O	0.82	-
Na_2O	0.33	-
Densidad (g/cm^3)	3.15	1.29
Superficie específica (m^2/g)	0.42	200
Diámetro promedio (μm)	13.1	0.060
Pérdida al fuego (%)	2.09	0.10

2.2 Dosificación y preparación de las mezclas

Se han preparado tres dosificaciones de hormigón autocompactante (Tabla 2) con distintas cantidades de nSi: un hormigón con 2,5% de adición de nano sílice (HAC[nSi]-2,5) y un hormigón con un 5% de adición (HAC[nSi]-5). Como control, se ha utilizado un hormigón sin adición (HAC).

Tabla 2. Dosificación de los hormigones estudiados

Componente (Kg/m^3)	HAC	HAC[nSi]-2,5	HAC[nSi]-5
Relación (a/c)	0,36	0,36	0,36
Cemento (kg)	450	450	450
Nano sílice	-	11,25	22,5
Agua (l)	162	166,05	170,1
Filler Calizo (kg)	100	100	100
Arena	1160	1160	1160
Grava (6-12)	585	585	585
Superplastificante	9	15,75	18
Modificador viscosidad	0,675	0,675	0,675

a/c: relación agua/material cementante.

En todas las dosificaciones se ha fijado la cantidad de cemento (450 kg) y la relación a/c = 0,36, de manera que sólo se realizan variaciones en la cantidad de aditivo superplastificante para garantizar la trabajabilidad de los hormigones. Cabe destacar la necesidad de aumento de la cantidad de superplastificante a medida que es mayor la cantidad de nSi presente en la mezcla.

2.3 Caracterización de los hormigones en estado fresco

Para evaluar las características de autocompactabilidad de los hormigones utilizados se realizan, en estado fresco, los ensayos normalizados que establece la instrucción EHE-08 [1]. Se realiza el ensayo de escurrimiento (UNE-EN 12350-8) [11], el ensayo del embudo en V (UNE-EN 12350-9) [12], el ensayo de la caja en L (UNE-EN 12350-10) [13] y el ensayo de escurrimiento con anillo japonés (UNE-EN 12350-12) [14].

Una vez comprobada la autocompactabilidad de las mezclas se procede a la fabricación de 8 probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura por cada dosificación. A las 24 horas de su fabricación las probetas se desmoldan y se sumergen en un baño de agua colocado dentro de una cámara de curado a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-2 [15].

2.4 Evaluación de las propiedades mecánicas

A los 7 y 28 días de su fabricación, dos probetas se ensayaron a compresión según la norma UNE-EN 12390-3 [16]. El ensayo se realizó en una prensa IBERTEST, con una capacidad máxima de 1.500 kN, constituida por dos platos de compresión.

2.5 Caracterización microestructural

Para la caracterización microestructural de los hormigones se realizó un ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio (PIM) de acuerdo a la norma ASTM D4404-84 (2004) [17] y un análisis termogravimétrico (ATG) según la norma ASTM E1131:(2008) [18].

En la PIM se han determinado los diámetros de poros umbral y crítico, así como la porosidad total y la distribución porosa de cada hormigón ensayado. El análisis termogravimétrico ha permitido determinar la cantidad de CSH y de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente en cada hormigón.

Para la PIM se utiliza un porosímetro Micromeritics, modelo Autopore IV 9500, que alcanza una presión máxima de 33.000 psi, cubriendo un rango de tamaño de poros entre 5 nm y 180 μm . Para el ATG, el equipo utilizado, es un analizador térmico simultáneo, marca

SETARAM, modelo LABSYS EVO, con una balanza de precisión de 0,1 μg .

2.6 Evaluación de la durabilidad

El comportamiento durable de los hormigones se evalúa mediante la penetración de cloruros. Para ello se han realizado dos ensayos, uno utilizando el método de migración y otro mediante la determinación de la resistividad eléctrica.

La realización del ensayo de migración de cloruros se llevó a cabo según la norma noruega NT BUILD 492 [19]. Para la obtención de la resistividad eléctrica de los hormigones se realizó el ensayo de acuerdo a lo establecido en la norma UNE 83988-1 (2008) [20]. El equipo empleado es de la marca GIATEC, modelo RCON, que mide resistencia eléctrica con frecuencias entre 1 Hz y 30 kHz y que permite establecer una relación entre los valores de resistividad eléctrica en Ωcm con la clasificación frente a penetrabilidad de cloruros de la normativa ASTM C1202 [21].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización en estado fresco.

Los resultados de los ensayos realizados en estado fresco se muestran en la tabla 3. En ella, se puede observar que tanto el tiempo de escurrimiento como el de flujo del ensayo del embudo en V disminuyen a medida que aumenta la cantidad de nano sílice de la mezcla y la cantidad de superplastificante.

Tabla 3. Ensayos de caracterización de los hormigones en Estado Fresco

Ensayo		HAC	HAC[nSi]- 2,5	HAC[nSi]- 5
Extensión de flujo	T_{50} (s)	5,5	4,17	2,53
	d_f (mm)	727,5	720	815
Embudo en V	T_V (s)	17,25	15,1	11,44
Caja en L	C_{bl}	0,98	0,96	0,97
Extensión de flujo con anillo Japonés	d_{jf} (mm)	709	685	805

Esto puede indicar que las cantidades de superplastificante pueden ser ajustadas de manera que puedan reducirse y así evitar sobrepasar el límite máximo que permite la EHE 08 [1] (5% de SP) al aumentar la cantidad de nSi.

3.2 Propiedades mecánicas.

En la tabla 4 se recogen los resultados del ensayo de resistencia a compresión y los valores relativos correspondientes a 7 y 28 días de curado.

No existe una proporcionalidad entre el incremento resistente y la cantidad de nSi adicionada. Esto conduce a suponer que, posiblemente, la cantidad de nano adición efectiva en hormigones autocompactantes sea en porcentajes menores al 10%.

Tabla 4. Resultados de resistencia a compresión

Ensayo	HAC	HAC[nSi]-2,5	HAC[nSi]-5
Resistencia a compresión (MPa)			
7 días	53,36	67,40	66,53
28 días	63,16	74,06	81,50
Valor relativo (%)			
7 días	100	126,31	124,68
28 días	100	117,30	129,00

3.3 Caracterización Microestructural.

- Porosimetría por intrusión de Mercurio.

En la tabla 6 se muestran los valores del diámetro de poro umbral, diámetro de poro crítico y porosidad total así como sus valores relativos para cada uno de los hormigones ensayados. Se puede observar que la adición de nSi conlleva una disminución significativa de los tamaños de diámetro de poro crítico y diámetro de poro umbral. Esto produce un refinamiento de la estructura porosa. El diámetro de poro crítico, en el hormigón con 2,5% de nSi, disminuye en un 30% y un 20% el diámetro umbral. De igual manera ocurre con el hormigón con un 5% de nSi, en el que la disminución del diámetro crítico y umbral son de un 50% y un 46% respectivamente.

Tabla 6. Diámetro de poro crítico, diámetro de poro umbral y porosidad total de los hormigones

	HAC	HAC[nSi]-2,5	HAC[nSi]-5
Diámetro crítico (µm)	0.024	0.017	0.012
Diámetro umbral (µm)	0.062	0.050	0.040
Porosidad total (%)	7.7	7.0	7.9
Valor relativo			
Diámetro crítico (%)	100	70.8	50.0
Diámetro umbral (%)	100	80.6	64.5

Los valores de la porosidad total (Tabla 6), se sitúan entre el 7% y el 7,9%. Para considerar diferencias apreciables en la porosidad total, estas deben estar en torno al 10%-15%. En el caso de los hormigones ensayados, la mayor diferencia es de 0,9% lo que significa porosidades totales similares.

En la figura 1 se muestra la distribución porcentual de poros, cuya clasificación es una adaptación de la de Mindess [22]. Se observa el aumento significativo de la cantidad de poros capilares de gel y poros capilares medianos, unido a una disminución de la cantidad de poros capilares grandes y macroporos, a medida que aumenta la adición de nSi. Es sabido que la durabilidad

de un hormigón depende, en gran medida, de los poros capilares de gel y los poros capilares medianos, mientras que la resistencia a compresión depende de los poros capilares grandes y los macroporos [22], por tanto cabe esperar que la adición de nSi proporcione a los hormigones autocompactantes una mejora significativa de su durabilidad, junto a una mayor resistencia a compresión.

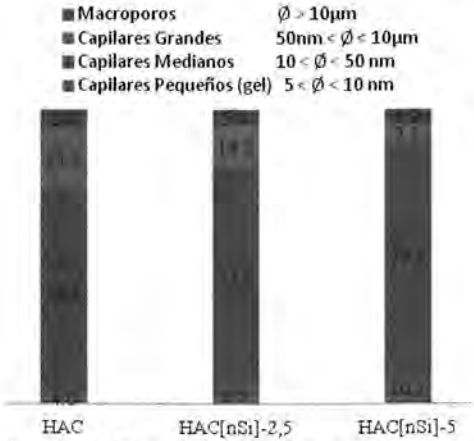


Figura 1. Distribución porcentual de poros

- Análisis Termogravimétrico

En la figura 2 se resumen los resultados del ATG. Se muestran los porcentajes de CSH, tomando como referencia las pérdidas de agua en un rango de temperaturas entre 100°C y 400°C [23], y de Ca(OH)₂, tomando como referencia las pérdidas de agua en un rango de temperaturas entre 400°C y 500°C [23]. Se observa un aumento en la cantidad de CSH asociada a una disminución en la cantidad de Ca(OH)₂ en función de la masa total. Este resultado permite afirmar que la actividad puzolanica de la nSi hace que reaccione con la portlandita, reduciéndose su contenido, y formando una mayor cantidad de CSH, de forma análoga al comportamiento de los hormigones con humo de sílice. Los valores relativos de gel y portlandita para los hormigones con nanosílice parecen indicar un diferente contenido de agua en los geles secundarios formados o una reducción en el grado de hidratación.

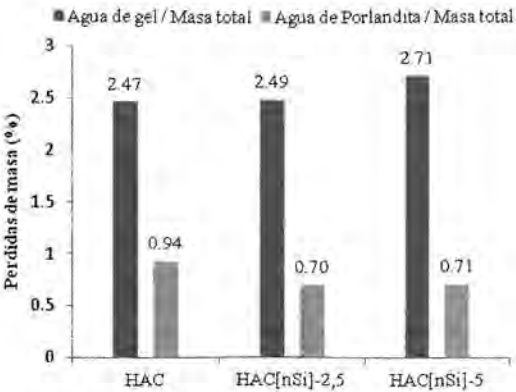


Figura 2. Resultados del análisis termogravimétrico.

3.4 Durabilidad.

- Migración de Cloruros

En la figura 3 se muestran los resultados del ensayo de migración de cloruros. Se observa una disminución significativa del coeficiente de migración al adicionar nSi a la mezcla. Esta disminución es del 51,6% para el HAC[nSi]2,5 y del 55,7% para el HAC[nSi]5, respecto al hormigón sin adición. Sin embargo, este efecto no presenta una relación lineal con la cantidad de adición aportada, y prueba de ello es la disminución del 8,5% en el coeficiente de migración del HAC[nSi]-5 frente al HAC[nSi]-2,5, no siendo esta diferencia estadísticamente significativa.

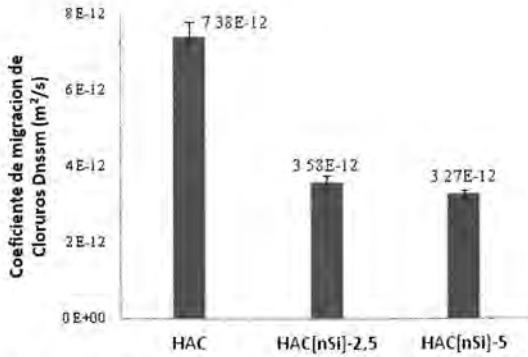


Figura 3. Resultados de migración de cloruros

- Resistividad Eléctrica

Los resultados de la resistividad eléctrica se muestran en la figura 4. Los valores de resistividad eléctrica son de 242,95 Ωm para el HAC[nSi]-2,5 y de 344,26 Ωm para el HAC[nSi]-5, representando un incremento del 50,8% y 113% respectivamente, en relación con el hormigón sin adición.

De acuerdo con estos valores de la resistividad, y de la relación que puede establecerse entre estos y la carga eléctrica, los hormigones con adición de nSi pueden clasificarse como hormigones de muy baja penetrabilidad de cloruros.

Un aspecto que puede tener relevancia es la cantidad de aditivo superplastificante necesario para que la masa sea trabajable, ya que este aditivo puede cambiar significativamente las características físico-químicas de la fase acuosa pudiendo provocar gran variabilidad en los valores de la resistividad eléctrica [23].

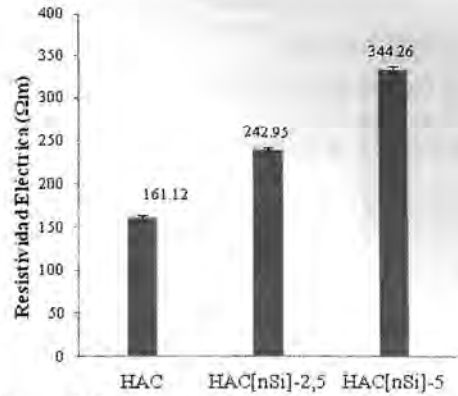


Figura 4. Resultados de resistividad eléctrica

4. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en esta investigación se pueden enunciar las siguientes conclusiones:

- Las dosificaciones propuestas tienen características de autocompactabilidad.
- La adición de nano sílice conlleva un aumento significativo de la resistencia a compresión en los hormigones autocompactantes.
- No existe una relación lineal entre la cantidad de nano sílice y la resistencia a compresión a 28 días.
- La porosidad total es baja y similar en todos los hormigones estudiados.
- La adición de nano sílice reduce significativamente el diámetro de poro umbral y poro crítico y modifica significativamente la distribución porosa provocando un incremento de los poros de gel y poros medianos, asociados a una disminución de los poros grandes y macroporos
- Con la adición de nano sílice se obtienen mejoras significativas en cuanto a la penetración de cloruros, reduciéndose a la mitad el coeficiente de migración de cloruros.
- La mayor cantidad de adición de nano sílice conduce a mejoras en la durabilidad del hormigón, sin embargo la cuantificación de estas varía según el ensayo con que se realice la medición.
- El necesario aumento del contenido de aditivos en la fabricación del hormigón a fin de conseguir la reología requerida, puede modificar las características físico-químicas de la fase acuosa y generar una estimación errónea de la durabilidad, si esta se hace a través de la medida de la resistividad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del Ministerio de Ciencia y Tecnología, Proyecto BIA2009-14395-C04-04 y del Ministerio de Fomento proyectos C14/2006 y C01/2007. También desean expresar su agradecimiento por el apoyo financiero prestado por el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

5. REFERENCIAS

- [1] EHE-08. "Instrucción de Hormigón Estructural". Serie Normativa, Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica. 4ª Edición 2010. Madrid.
- [2] Okamura, H.. "Self compacting high-performance concrete". Concrete International, 19 (7), pp. 50-54. (1997).
- [3] Zyganitidis, I., Stefanidou, M., Kalfagiannis, N., Logothetidis, S. "Nanomechanical characterization of cement-based pastes enriched with SiO_2 nanoparticles". Materials Science and Engineering B 176. 1580 – 1584. (2011).
- [4] Q. Ye. "Research on the comparison of pozzolanic activity between nano- SiO_2 and silica fume". Concrete 3 19– 22. (2001).
- [5] R.S. Chen, Q. Ye. "Research on the comparison of properties of hardened cement paste between nano- SiO_2 and silica fume added". Concrete 1 7 – 10. (2002).
- [6] Q. Ye, Z.N. Zhang, R.S. Chen, C.C. Ma. "Interaction of nano- SiO_2 with calcium hydroxide crystals at interface between hardened cement paste and aggregate". Journal of the Chinese Ceramic Society 31 (5) 517–522. (2003).
- [7] Tao Ji. "Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano- SiO_2 ". Cement and Concrete Research 35. 1943 – 1947. (2005).
- [8] Said, A.M., Zeidan M.S., Bassuoni, M.T., Tian Y., "Properties of concrete incorporating nano-silica". Construction and Building Materials 36. 838–844. (2012).
- [9] Ali Nazari, Shadi Riahi "Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self-compacting concrete containing SiO_2 nanoparticles". Materials Science and Engineering A 527.7663–7672. (2010).
- [10] Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M., Pouladkhan, A. R. "Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO_2 micro and nanoparticles". Materials and Design 34. 389–400. (2012).
- [11] UNE-EN_12350-8:2011. "Ensayos de hormigón fresco. Parte 8 Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento". Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR.
- [12] UNE-EN_12350-9:2011. "Ensayos de hormigón fresco. Parte 9 Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V". Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR.
- [13] UNE-EN_12350-10:2011. "Ensayos de hormigón fresco. Parte 10 Hormigón autocompactante. Método de la caja en L". Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR.
- [14] UNE-EN_12350-12:2011. "Ensayos de hormigón fresco - Parte 12 Hormigón autocompactante. Ensayo con el anillo japonés". Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR.
- [15] UNE-EN 12390-2:2009. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia". Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR.
- [16] UNE-EN 12390-2:2009. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas". Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR.
- [17] ASTM D4404-84(2004). "Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry". American Society for Testing and Materials. ASTM International, United States
- [18] ASTM E1131-08 (2008). "Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry". Edition: 2008. American Society for Testing and Materials. ASTM International, United States.
- [19] NT BUILD 492 (1999). "Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments". Published by NORDTEST Finland. ISSN 0283–7153
- [20] UNE 83988-1:2008. "Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 1: Método directo (método de referencia)". Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR.
- [21] ASTM C 1202. "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration". ASTM International, West Conshohocken, United States (2010).
- [22] Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. "Concrete". Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458. 2nd Edition. (2003).
- [23] Rivera Lozano, J. "La hidratación de la pasta de cemento con adiciones activas". Tesis doctoral. Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. (2004).